第47卷　第5期
2024年5月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47　No. 5
May 2024

2000—2022年伊犁河流域植被时空变化特征

李雅倩[1]，　杨建华[1]，　夏皓斌[1]，　武建军[1,2]

（1. 天津师范大学京津冀生态文明发展研究院，天津　300387；2. 北京师范大学地理科学学部，北京　100875）

摘　要：伊犁河流域横跨中哈两国，生态环境脆弱，深化对全流域植被变化的认识对于该地区生态可持续发展具有重要意义。基于MODIS的增强型植被指数（EVI）数据，深入研究了2000—2022年整个伊犁河流域植被的时空变化特征，并对比了中国境内外伊犁河流域、不同植被类型、不同高程间植被变化的差异。结果表明：（1）2000年以来伊犁河流域植被总体呈现改善趋势，尤其是哈萨克斯坦境内的植被，然而中国境内植被有退化趋势。植被退化区域的高程集中在1000~3000 m之间；草地和耕地以改善为主，林地则相反。（2）过去20 a间，伊犁河流域植被总体波动较小，但中国境内流域植被的波动性较大。与林地和耕地相比，草地的波动性更大。高程在2500~3000 m区域内的植被波动小。（3）未来伊犁河流域植被状况以持续改善为主，持续改善面积约占全流域面积的52%。草地持续改善的面积占比高于耕地和林地。高程低于1000 m和高于3000 m区域的植被以持续改善为主。研究结果将有助于加深对伊犁河流域植被变化特征的理解，为流域生态环境保护提供科学参考。

关 键 词：MODIS EVI；变化趋势；持续性；伊犁河流域

文章编号：1000－6060(2024)05－0741－12(0741～0752)

作为地表生态系统的重要组成部分，陆地植被可以通过光合作用、呼吸作用、蒸腾作用调节地球表面的能量平衡、水循环等。植被还会影响国家或地区的产业结构和经济发展，特别是在以农业和畜牧业为主要经济活动的干旱和半干旱区[1]。深入理解植被的时空变化特征，对于确保陆地生态系统的可持续性至关重要，特别是在对环境变化极其敏感的地区[2]。植被指数是评估植被生长状况的关键指标，其中归一化植被指数（NDVI）是表征植被生长状况、监测生态环境的有效指标[3]，但NDVI在植被生长茂盛阶段容易饱和，而增强型植被指数（EVI）能够减弱大气和地面反射率的影响以及弱化植被冠层背景变化的影响[4-5]，有效避免植被饱和现象。因此，近年来，国内外学者利用长时间序列的EVI数据，从不同区域尺度对地表植被的变化趋势进行了深入研究。廖成浩等[6]基于MOD13Q1的EVI数据，利用一元线性回归方程和F检验法探究了2000—2018年江西省植被时空动态，发现江西省EVI总体呈现增加趋势。阮惠华等[7]利用MOD13A2的EVI数据产品，系统分析了近20 a粤港澳大湾区植被在不同时间尺度上的时空变化趋势，发现粤港澳大湾区EVI整体呈显著增加趋势。Qiu等[8]基于MOD13A2的EVI数据，评价了中国2001—2011年植被动态的时空非平稳性，结果发现不同气候区域的农作物、天然森林和草甸具有明显的年际变化特征。基于MOD13Q1的EVI数据，Gu等[9]研究了安徽省近20 a的植被变化，发现安徽省的EVI总体呈波动增加趋势，相对稳定，但未来可能会出现相反的情况。

伊犁河流域位于亚洲中部，属于干旱与半干旱地区，伊犁河三角洲下游因自然和人类活动等多种因素的影响，出现了土地盐碱化、生物多样性减少、伊犁河流域湖水减少等生态问题[10]。伊犁河流域

收稿日期：2023-09-10；　**修订日期**：2023-12-16
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目（2022xjkk0600）资助
作者简介：李雅倩（2000-），女，硕士研究生，主要从事植被遥感研究. E-mail: 15205503050@163.com
通讯作者：武建军（1972-），男，博士，教授，主要从事3S技术集成与灾害应急响应、自然灾害理论、干旱灾害监测与风险评估等方面的研究. E-mail: jjwu@bnu.edu.cn

作为中哈之间的国际河流流域,脆弱的生态环境已经引起中哈两国的共同关注。目前,相关学者利用遥感数据已对伊犁河流域植被变化做了大量研究。基于MODIS的NDVI数据产品,已有研究发现伊犁河流域植被呈现退化趋势,同时年际波动减小[11-13]。另外,Jiao等[14]基于2000—2014年MODIS NDVI数据,探究了伊犁河谷植被净初级生产力(NPP)的时空格局,同样发现近年来伊犁河谷植被变化趋势以退化为主。

综上所述,相关学者在伊犁河流域植被变化趋势领域已经开展了较为深入的研究,研究结果对于认识伊犁河流域植被变化特征具有重要意义。但是以往学者更加关注伊犁河流域中国境内植被的时空变化特征,缺乏对整个伊犁河流域的研究,导致对伊犁河流域整体植被变化特征的认识不足,另外,目前缺少对中国境内和境外伊犁河流域植被变化的对比研究,难以满足保护跨界河流和评估"一带一路"生态环境建设的需要。

本研究旨在全面深入地探究伊犁河流域植被时空变化特征,以整个伊犁河流域为研究区,基于2000—2022年的MOD13A1的EVI数据、MCD12Q1地表覆盖类型数据和数字高程模型(DEM)数据,利用Sen-MK趋势分析法、变异系数以及Hurst指数,探究伊犁河流域植被的时空变化趋势、稳定程度以及变化趋势的可持续性,并在此基础之上,进一步研究中国境内外植被、不同高程植被和不同类型植被的分异特征。研究结果可为伊犁河流域植被保护、生态环境质量改善以及促进区域的可持续发展等提供科学理论依据。

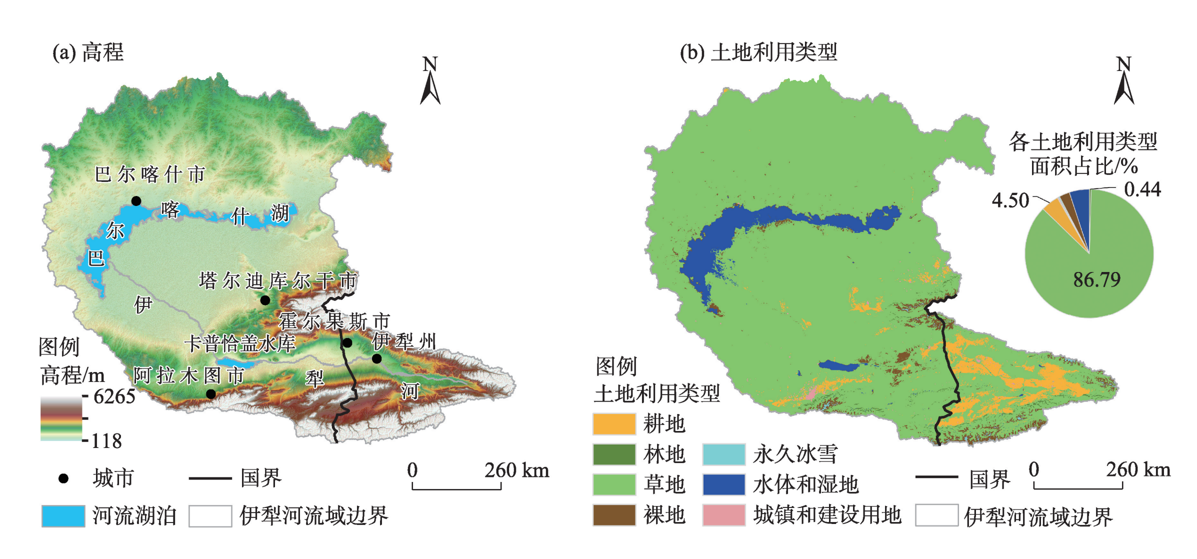
1 数据与方法

1.1 研究区概况

伊犁河流域(72.00°~85.00°E,42.26°~49.37°N)位于亚洲中部,流域85%位于哈萨克斯坦境内,15%位于中国境内[15]。伊犁河流域气候类型为温带大陆性气候,受地形影响可将该流域大致分为南部高寒湿润区、中部河谷半湿润区和北部温带干旱区3个气候区。该流域的地貌类型可以分为3类,分别为:伊犁河上中游河谷地区、伊犁河下游沉积-冲积平原区和伊犁河下游荒漠区(图1a)。伊犁河流域植被类型以草地、耕地和林地为主,草地面积占比为86.79%,主要分布于哈萨克斯坦境内;耕地面积占比为4.50%,主要分布于中国境内;林地面积占比为0.44%,主要分布于中国境内海拔较高的区域(图1b)。伊犁河是该流域的主要河流,发源于天山西部哈萨克斯坦境内,流经中国新疆伊犁地区后,最后流入哈萨克斯坦境内的巴尔喀什湖[16]。

1.2 研究数据

本研究所需的数据主要包括卫星遥感数据(EVI数据)、土地覆盖类型数据和DEM数据。其中EVI数据用于代表伊犁河流域的植被生长状态,该数据来源于美国国家航空航天局网站(https://www.nasa.gov/)的Terra星陆地植被指数产品MOD13A1,



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

其时间和空间分辨率分别为16 d和500 m。本研究利用平均值法合成伊犁河流域2000—2022年植被生长季（5—9月）的EVI，相较于最大值合成法，平均值法能更全面地反映植被生长记的状况，可避免极端气候异常对植被的影响[17-18]。在本研究中，EVI值小于0.1的区域为非植被区域，主要包括湿地和水体。土地覆盖类型数据来源于全球土地覆盖产品MCD12Q1（https://code.earthengine.google.com/），其空间分辨率为500 m，该产品包含了8个分类标准，本研究采用IGBP（International geosphere biosphere program）分类方案，该分类体系共有17种不同的土地覆盖类型，最后选取林地、耕地、草地这3种植被类型作为主要研究对象，其中林地包括阔叶林、针叶林和混交林[19-20]。伊犁河流域DEM数据主要由GMTED2010（https://code.earthengine.google.com/）提供，其空间分辨率为250 m。为保持数据一致，将DEM数据重采样到500 m。

1.3 研究方法

1.3.1 植被变化趋势分析方法 本研究采用Theil-Sen中值分析和Mann-Kendall（M-K）检验相结合的方法对伊犁河流域植被EVI长时间序列进行趋势识别[21]。Theil-Sen中值分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法，适用于长时间序列数据的趋势分析，计算公式如下：

$$\beta = \mathrm{median}\left[\frac{(\mathrm{EVI}_j - \mathrm{EVI}_i)}{j-i}\right] \quad (1)$$

式中：β为EVI时间序列数据的斜率，表征EVI的变化趋势，$\beta>0$表示EVI呈增加趋势，反之呈下降趋势；median为时间序列的中位数函数；EVI_i和EVI_j分别为时间序列为第i、j年的EVI值，i、$j=1, 2, \cdots, n$；n为本研究的时间序列数据长度。

由于该方法缺乏对趋势分析的统计显著性检验，本研究采用M-K检验方法进行评估，该方法也属于非参数统计检验方法，由Mann等[22]提出，M-K检验公式如下：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}\left(\mathrm{EVI}_j - \mathrm{EVI}_i\right) \quad (2)$$

$$\mathrm{sgn}\left(\mathrm{EVI}_j - \mathrm{EVI}_i\right) = \begin{cases} +1, & \mathrm{EVI}_j - \mathrm{EVI}_i > 0 \\ 0, & \mathrm{EVI}_j - \mathrm{EVI}_i = 0 \\ -1, & \mathrm{EVI}_j - \mathrm{EVI}_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathrm{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S<0 \end{cases} \quad (5)$$

式中：S为检验统计量，呈正态分布；$\mathrm{Var}(S)$为S的方差；sgn为秩序列；Z为标准正态统计变量。在α显著水平下，当$|Z|>Z_{1-\alpha/2}$时，则时间序列在α水平上表现出显著的可变性。本研究选择了0.01和0.05的显著性水平，将结果分为：极显著改善（$\beta>0$，$P<0.01$）、显著改善（$\beta>0$，$P<0.05$）、不显著改善（$\beta>0$，$P>0.05$）、极显著退化（$\beta<0$，$P<0.01$）、显著退化（$\beta<0$，$P<0.05$）和不显著退化（$\beta<0$，$P>0.05$）。

1.3.2 变异系数 本研究采用变异系数（C_v）来表示伊犁河流域2000—2022年EVI的波动程度，计算公式如下：

$$C_v = \frac{\sigma}{X} \quad (6)$$

式中：σ为EVI标准差；X为EVI平均值。依据陈淑君等对C_v的划分标准[23]，将C_v划分为低波动（$C_v \leqslant 0.05$）、较低波动（$0.05<C_v \leqslant 0.10$）、中等波动（$0.10<C_v \leqslant 0.15$）、较高波动（$0.15<C_v \leqslant 0.20$）、高波动（$C_v>0.20$）。

1.3.3 Hurst指数 Hurst指数是一种定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法，可以有效预测时间序列的未来趋势，被广泛应用于水文学、气候学和生态学领域[24]，计算过程如下：

给定一时间序列$\{\mathrm{EVI}_t, t=1, 2, \cdots, n\}$，对于任意整数$\tau=1, 2, \cdots, n$，定义均值序列：

$$\xi_{(\tau)} = \frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\mathrm{EVI}_t, \quad \tau=1, 2, \cdots, n \quad (7)$$

式中：$\xi_{(\tau)}$为τ时间段内EVI的平均值；τ为研究时段；t为年份；EVI_t为第t年的EVI值。

累计离差计算公式如下：

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{u=1}^{t}[\mathrm{EVI}_u - \xi_{(\tau)}], \quad 1 \leqslant t \leqslant \tau \quad (8)$$

式中：$X_{(t,\tau)}$为t年内累计离差；u为年份；EVI_u为第u年的EVI值。

极差计算公式如下：

$$R_{(\tau)} = \max_{1\leqslant t\leqslant\tau} X_{(t,\tau)} - \min_{1\leqslant t\leqslant\tau} X_{(t,\tau)}, \quad \tau=1, 2, \cdots, n \quad (9)$$

式中：$R_{(\tau)}$为τ时间段内极差；$\max_{1\leqslant t\leqslant\tau} X_{(t,\tau)}$为$\tau$时段内EVI最大值；$\min_{1\leqslant t\leqslant\tau} X_{(t,\tau)}$为$\tau$时段内EVI最小值。

标准差计算公式如下：

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\left(\mathrm{EVI}_t - \xi_{(\tau)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

式中：$S_{(\tau)}$ 为 τ 时间段内EVI的标准差。

Hurst指数计算公式如下：

$$\frac{R_{(\tau)}}{S_{(\tau)}} \propto (\tau)^H \tag{11}$$

式中：H 为Hurst指数，可通过最小二乘法拟合得到 H 值。在先前的研究中，H 值范围从0到1，并分为3种类型[25]。当 H=0.5时，表明伊犁河流域未来EVI的变化具有随机性；当 H>0.5时，表明具有正向可持续性，即伊犁河流域未来EVI变化将与当前趋势一致；H<0.5则表明可持续性为负，伊犁河流域未来EVI变化将与当前趋势相反。

2 结果与分析

2.1 伊犁河流域植被EVI的空间格局

对2000—2022年伊犁河流域植被生长季EVI平均值进行计算，并对其进行分级（图2a），同时对中国境内外伊犁河流域EVI平均值不同等级的面积占比进行统计（表1）。2000—2022年伊犁河流域植被生长季EVI平均值呈现显著的空间分布差异，整体上表现为南部高、北部和中部低、山地高于平原、中国境内流域高于哈萨克斯坦境内流域的分布状态。中国境内EVI平均值大于0.300的面积占比为59.92%，主要位于昭苏县、伊宁县、尼克勒县等。中国境外EVI均值主要介于0.100~0.200之间，其面积占比为53.90%。

通过逐像元分析2000—2022年植被生长季EVI的年际变化率，评价该指数在近20 a间生长季趋势的空间异质性（图2b）。从EVI年际变化率空间分布来看，2000—2022年伊犁河流域植被改善区域和植被退化区域在空间分布上具有明显的分异特征，其中植被退化区域主要分布在伊犁河谷两侧的天山山麓、卡普恰盖水库周围以及巴尔喀什湖以北的西部地区，植被改善区域主要分布在伊犁河中下游。

中国境内伊犁河流域植被以退化为主，境外伊犁河流域植被则以改善为主（表2）。在中国境内，EVI年际变化率小于0的面积占比为56.70%，表明伊犁河流域的植被在中国境内呈现退化趋势。相

表1 中国境内外伊犁河流域生长季增强型植被指数（EVI）平均值面积占比

Tab. 1 Area proportion of EVI mean values during the growing seasons in the Ili River Basin within and outside China

EVI平均值分级	境内面积占比/%	境外面积占比/%
<0.000	3.43	0.59
0.000~0.100	7.46	24.21
0.100~0.200	12.13	53.90
0.200~0.300	17.06	11.43
0.300~0.400	28.26	6.88
>0.400	31.66	2.99

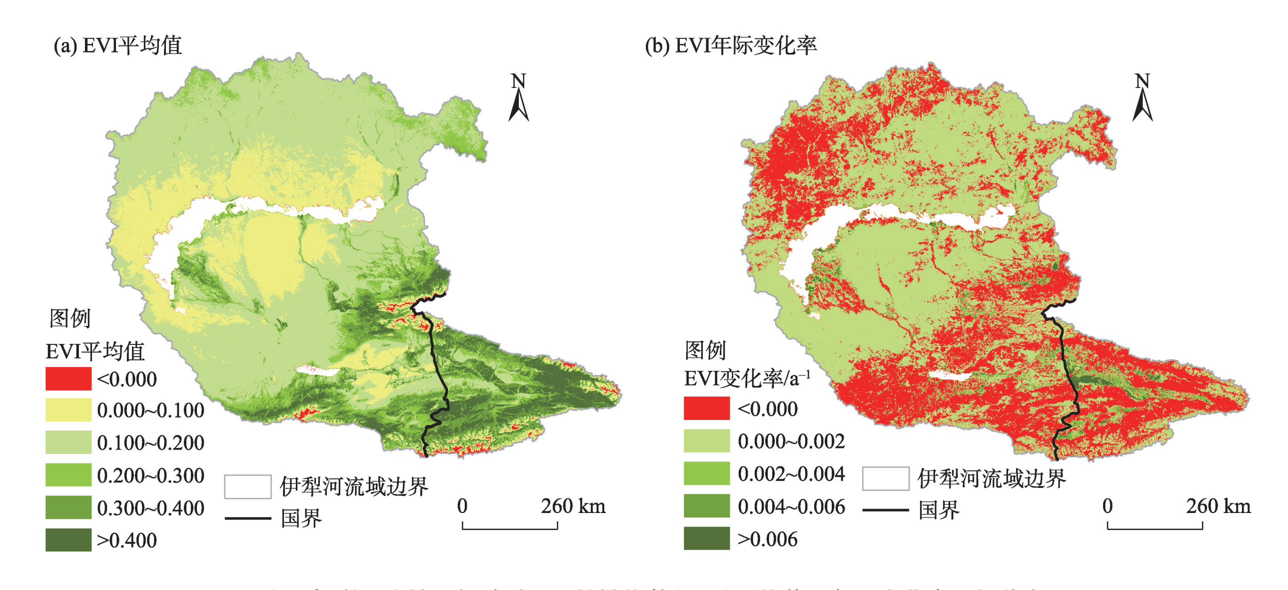


图2 伊犁河流域生长季增强型植被指数（EVI）平均值和年际变化率空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of mean values and interannual change rate of EVI during the growing seasons in the Ili River Basin

表2　中国境内外伊犁河流域生长季EVI年际变化率面积占比

Tab. 2　Area proportion of interannual change rate of EVI during the growing seasons in the Ili River Basin within and outside China

EVI年际变化率/a⁻¹	境内流域面积占比/%	境外流域面积占比/%
<0.000	56.70	35.26
0.000~0.002	29.70	62.06
0.002~0.004	6.91	1.78
0.004~0.006	2.97	0.55
>0.006	3.72	0.35

反地，在中国境外伊犁河流域，EVI年际变化率大于0的面积占比为64.74%，说明其植被状况主要呈现改善趋势。

2.2　伊犁河流域植被EVI的时空变化趋势

通过计算2000—2022年伊犁河流域所有植被及3种不同植被类型的EVI生长季平均值，绘制所有植被和不同植被类型生长季EVI的年际变化曲线（图3），分析伊犁河流域植被EVI总体变化趋势。从图3可以看出，2000—2022年伊犁河流域所有植被的生长季EVI平均值介于0.15~0.23之间，呈现出轻微的上升趋势。耕地、林地以及草地3种不同类型植被生长季EVI平均值表现为：耕地>林地>草地。草地生长季EVI呈现出相对平稳的年际变化趋势，耕地生长季EVI呈显出上升的年际变化趋势，林地生长季EVI则呈现出下降的年际变化趋势。

采用Theil-Sen方法计算伊犁河流域EVI年际变化率并利用M-K方法对其进行显著性检验，得到伊犁河流域生长季EVI变化趋势的空间分布（图4）。伊犁河流域EVI呈增加趋势的面积占比为61.90%，其中表现不显著的面积占比为50.75%，说明虽然伊犁河流域植被总体上呈现改善趋势，但改善效果并不显著；伊犁河流域EVI呈减少趋势的面积占比为38.10%，其中表现不显著的面积占比为33.29%，说明伊犁河流域植被退化趋势也不显著；EVI呈极显著增加趋势的面积占比为4.75%，主要分布在境内伊犁河谷中部和巴尔喀什湖以南、卡普恰盖水库以北之间的区域；EVI呈极显著减少趋势的面积占比为2.55%，主要分布在境内伊犁河谷两侧高海拔地区。

中国境内的伊犁河流域植被状况主要呈现退化趋势，境外流域的植被状况则主要呈现改善趋势，然而这2个地区的植被变化趋势都不显著（表3）。在中国境内，伊犁河流域EVI呈增加趋势的面积占比为43.30%，其中呈显著增加趋势的面积占比为15.64%，不显著增加趋势的面积占比为27.66%。与此同时，EVI呈减少趋势的面积占比为56.70%，其中呈显著减少的面积占比为19.61%，不显著减少的面积占比为37.09%。这表明，在中国境内，伊犁河流域的植被主要呈现退化趋势，并且无论是植被退化还是改善，其表现都不显著。统计境外EVI变化趋势的面积占比发现，境外植被主要变化趋势与境内相反，植被以改善为主，但是植被变化的显著性和境内植被表现一致。

对不同高程和不同植被类型下的EVI变化趋势进行了统计分析。从不同高程统计来看（图5a），在

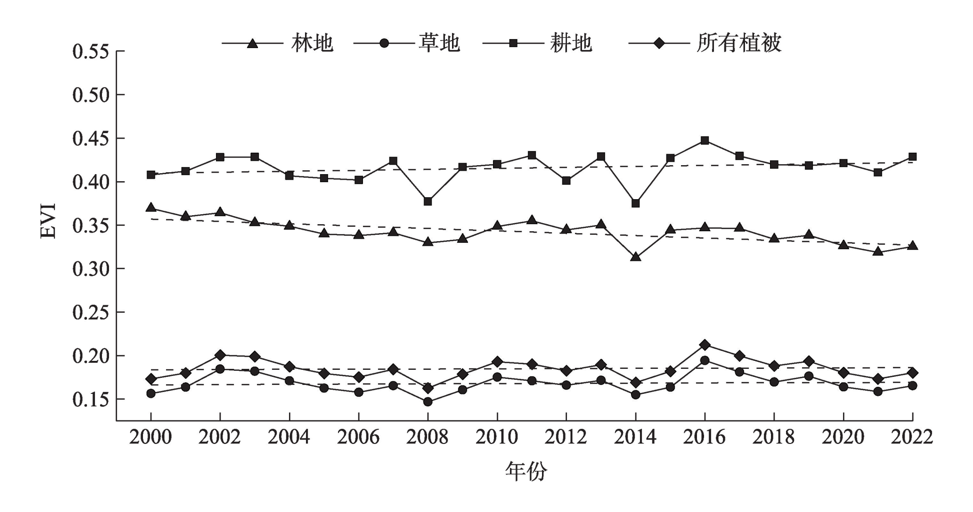


图3　伊犁河流域不同植被类型生长季EVI年际变化

Fig. 3　Interannual change of EVI of different vegetation types during the growing seasons in the Ili River Basin

高程低于500 m、500~1000 m以及大于3000 m的地区，植被的变化趋势以改善为主，尤其在高程低于500 m和大于3000 m这2个地区中，EVI呈增加趋势的面积占比为80%左右。在高程为1000~3000 m的地区，植被的变化趋势以退化为主，尤其在高程为2000~2500 m的地区中，EVI呈减少趋势的面积占比为80%左右。从不同植被类型统计来看(图5b)，林地表现出较为严重的退化趋势，林地EVI呈减少趋势的面积占比远大于呈增加趋势的面积占比，其中不显著减少的面积占比为42%~43%，极显著减少的面积占比为13%~15%。草地表现出改善的趋势，草地EVI呈增加趋势的面积占比为60%~65%，其中显著增加和极显著增加的面积占比相对较低，分别为10%~11%和5%~6%。耕地呈改善趋势和呈退化趋势的面积占比相当，均为50%左右。

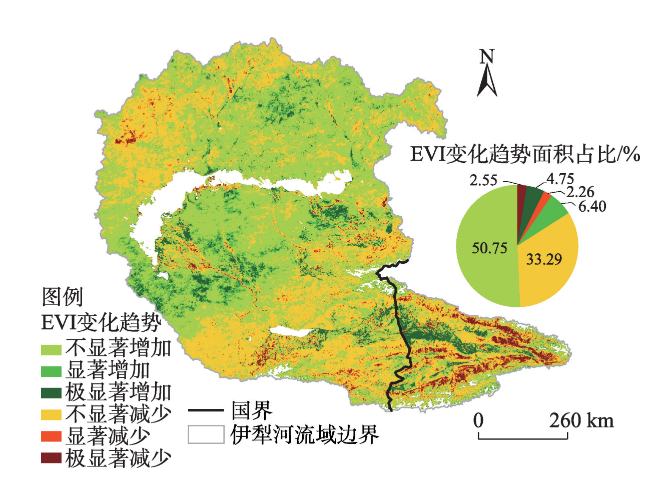


图4　伊犁河流域生长季EVI变化趋势空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of EVI changing trend during the growing seasons in the Ili River Basin

表3　中国境内外伊犁河流域生长季EVI变化趋势面积占比

Tab. 3　Area proportion of EVI changing trend during the growing seasons in the Ili River Basin within and outside China

EVI变化趋势	境内面积占比/%	境外面积占比/%
极显著增加	10.96	3.80
显著增加	4.68	6.66
不显著增加	27.66	54.28
不显著减少	37.09	32.71
显著减少	7.28	1.49
极显著减少	12.33	1.06

2.3　伊犁河流域植被EVI的波动性特征

2000—2022年伊犁河流域植被整体表现为中等波动变化趋势(图6)。其中，EVI波动程度中等及以下的面积占比为80.71%，分布在整个伊犁河流域地区，植被类型以草地为主。EVI波动程度高的面积占比为19.29%，主要位于伊犁河谷的部分地区、卡普恰盖水库周围和巴尔喀什湖西南角。

中国境内和境外的EVI呈现较低波动及以下的面积占比分别为69.47%和76.78%(表4)，这说明中国境内和境外伊犁河流域植被波动程度都以较低波动及以下为主。进一步观察发现，中国境内植被较高波动及以上的面积占比为9.03%，而境外植被较高波动及以上面积占比仅为4.47%，这表明中国境内植被变化的不稳定性相对于境外更高。

对伊犁河流域不同高程和不同植被类型的EVI

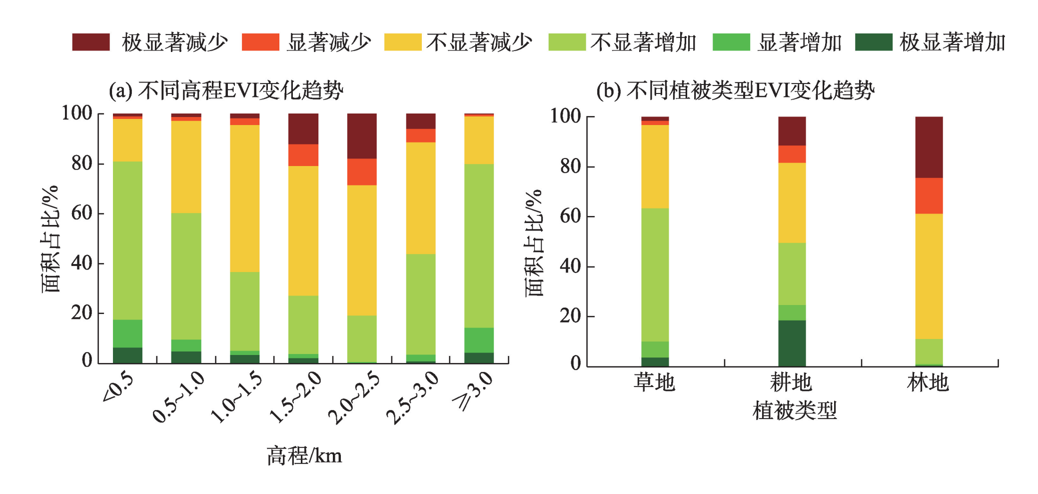


图5　伊犁河流域不同海拔和不同植被类型生长季EVI变化趋势面积占比

Fig. 5　Area proportion of EVI changing trend of different elevations and different vegetation types during the growing seasons in the Ili River Basin

波动程度面积占比进行统计分析。从不同高程统计来看(图7a)，所有高程内植被的波动程度主要表现为低波动和较低波动，其中在高程为2000~3000 m和2500~3000 m的地区，EVI呈较低波动及以下的面积占比分别为94%~95%、98%~99%。从不同植被类型统计来看(图7b)，草地、耕地以及林地都呈现比较稳定的趋势，其中林地表现最为稳定，林地EVI呈较低波动及以下的面积占比为98%~99%；耕地EVI呈较低波动及以下的面积占比为81%~82%；草地EVI呈较低波动及以下的面积占比为76%~77%。将3种植被EVI波动程度进行排序为：草地>耕地>林地。

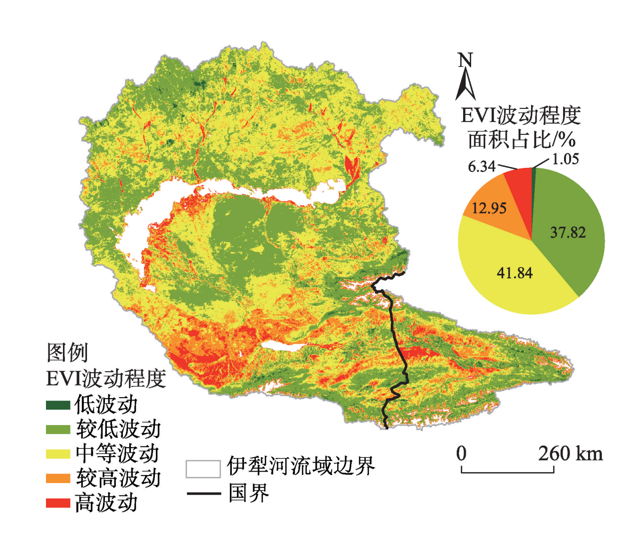


图6 伊犁河流域生长季EVI波动程度

Fig. 6 EVI fluctuation during the growing seasons in the Ili River Basin

表4 中国境内外伊犁河流域生长季EVI波动程度面积占比

Tab. 4 Area proportion of EVI fluctuation during the growing seasons in the Ili River Basin within and outside China

EVI波动程度	境内面积占比/%	境外面积占比/%
低波动	20.02	5.85
较低波动	49.45	70.93
中等波动	21.50	18.75
较高波动	4.38	3.38
高波动	4.65	1.09

2.4 伊犁河流域EVI的未来变化趋势

由2000—2022年伊犁河流域EVI的Hurst指数空间分布图(图8a)可见，伊犁河流域EVI的Hurst指数介于0.15~0.91之间。Hurst指数大于0.5的面积占比为79.04%，Hurst指数小于0.5的面积占比为20.96%，说明伊犁河流域植被EVI未来变化趋势具有较强正向持续性，即该流域大部分EVI未来的变化趋势将与过去一致。

为了预测伊犁河流域EVI未来变化的正向持续性和反向持续性特征，将Theil-Sen分析的Slope值与计算的Hurst指数进行叠加分析，得到EVI未来变化趋势空间分布图(图8b)。伊犁河流域流域EVI未来变化趋势的面积占比由高至低为：持续增加(52.33%)>持续减少(26.71%)>由减少变为增加(11.39%)>由增加变为减少(9.57%)。说明伊犁河流域植被未来变化趋势以持续改善为主，主要位于境内伊犁河谷中部呈条状分布以及卡普恰盖水库以

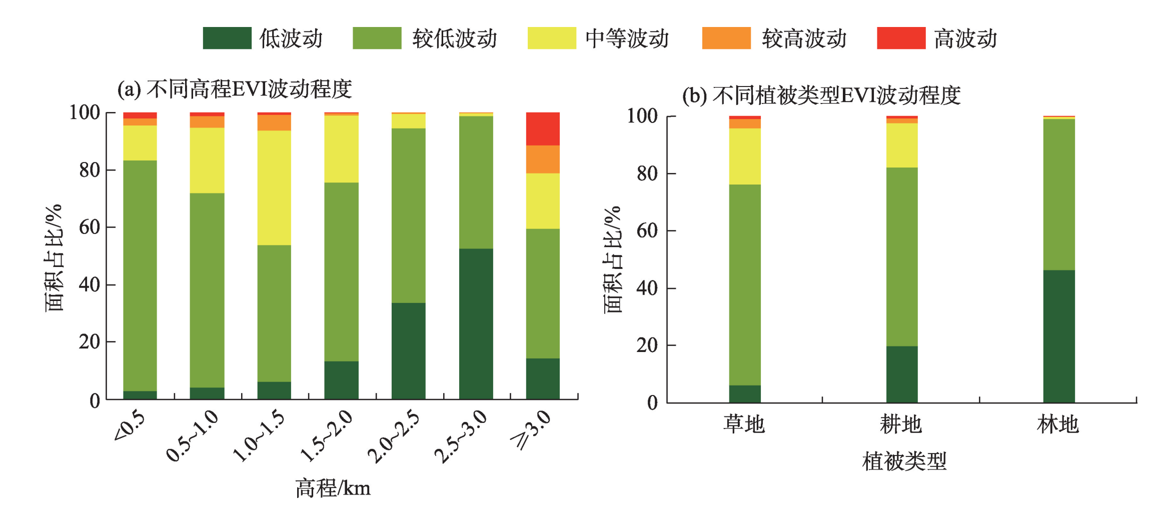


图7 伊犁河流域不同海拔和不同植被类型生长季EVI波动程度面积统计

Fig. 7 Area proportion of EVI fluctuation of different elevations and different vegetation types during the growing seasons in the Ili River Basin

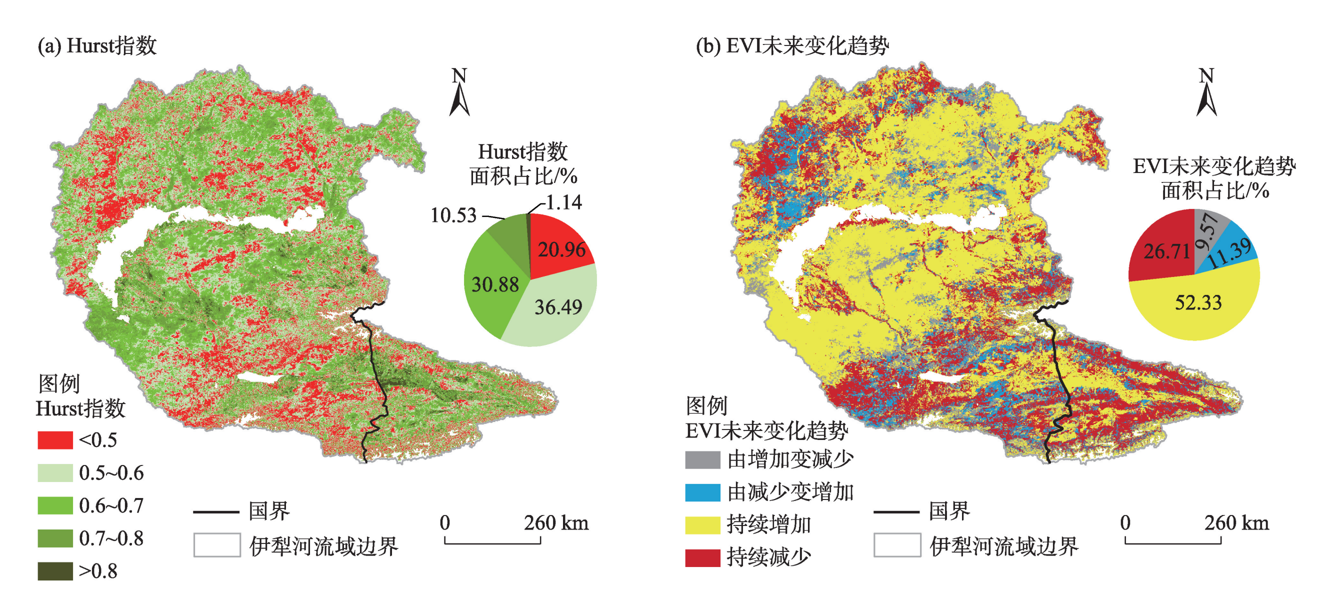


图8 伊犁河流域植被Hurst指数、EVI未来趋势

Fig. 8 Hurst vegetation index and future EVI trend in the Ili River Basin

北地区。未来植被呈现退化的区域主要分布于伊犁河谷两侧的天山山麓及卡普恰盖水库周边地区，由退化变为改善的区域主要位于巴尔喀什湖西北角。

未来一段时间内，中国境内植被以退化为主而境外植被以持续改善为主(表5)。在中国境内，EVI由增加变减少的面积占比为7.33%、持续减少的面积占比为44.71%，相比之下，在中国境外，EVI由减少变增加的面积占比为11.29%、持续增加的面积占比为54.83%。此外，中国境内EVI持续减少的面积占比为44.71%，高于境外的23.96%，同时，中国境内EVI持续增加的面积占比为35.97%，远低于境外的54.83%。这说明未来一段时间内中国境内的植被退化情况更为严重，而境外的植被改善情况相对更好。

为了探究伊犁河流域不同高程植被和不同类型植被未来变化趋势，分别对其面积占比进行了统计(图9)。不同高程其植被未来变化趋势明显不同(图9a)，在高程低于1000 m和高于3000 m的地区，植被未来变化趋势以持续改善为主，其中在高程低于500 m的地区，EVI未来持续增加的面积占比为72.17%。在高程为1500~2500 m的地区，植被未来变化趋势则以持续退化为主，其中在高程为1500~2000 m的地区，EVI未来持续减少的面积占比为56%~57%；在高程为2000~2500 m的地区，EVI未来持续减少的面积占比为60%~61%。不同类型植被未来变化趋势也存在差异(图9b)。草地EVI未来持续增加的面积占比为53%~54%，由减少变为增加

表5 中国境内外伊犁河流域EVI未来变化趋势面积占比

Tab. 5 Area proportion of the future trend of EVI in the Ili River Basin within and outside China

EVI未来变化趋势	境内面积占比/%	境外面积占比/%
由增加变减少	7.33	9.92
持续减少	44.71	23.96
持续增加	35.97	54.83
由减少变增加	11.99	11.29

的面积占比为15%~16%，表明草地未来变化趋势以改善为主。耕地EVI未来增加和减少的面积占比分为52%~53%、47%~48%，表明耕地未来变化趋势为一半退化一半改善。林地未来EVI增加和减少面积占比分别为24%~25%、75%~76%，表明林地未来变化趋势以继续退化为主。

3 讨论

2000—2022年所有植被生长季平均EVI在0.15~0.20之间波动，这与王倩等[12]的结论差别较大，这是因为王倩等采用最大值合成法(MVC)获得NDVI值而本文采用平均值法得到EVI值。伊犁河流域EVI的空间格局结果显示，该流域多年生长季EVI平均值在中国境内部分显著高于哈萨克斯坦境内部分，空间分布差异显著，这种差异主要受地形地貌、海拔高度、温度、区域降水量、土地利用类型

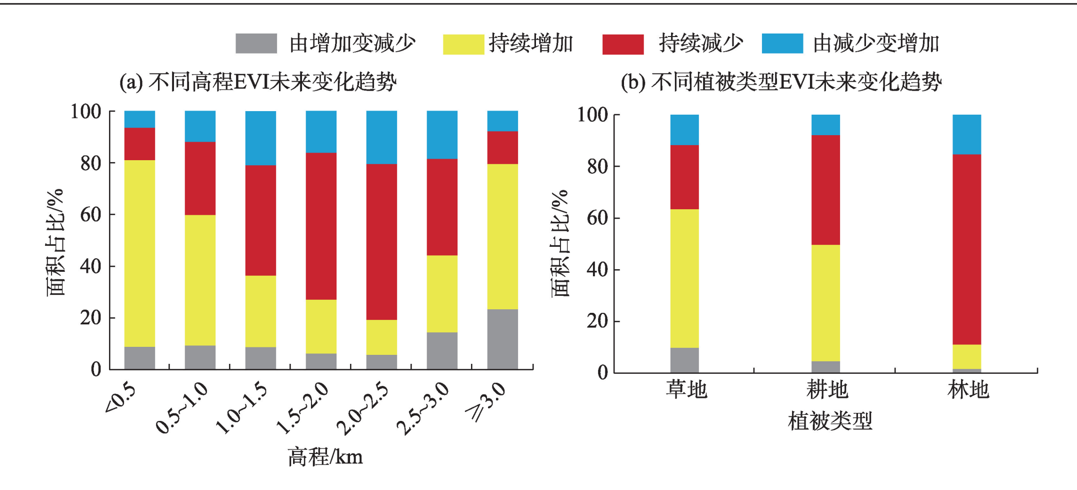


图9　伊犁河流域不同海拔和不同植被类型EVI未来趋势面积统计

Fig. 9　Area proportion of the future trend of EVI of different elevations and different vegetation types in the Ili River Basin

等影响[26-27]。伊犁河流域的EVI在不同海拔高度上表现出明显的差异,这种差异主要与当地的气温和水分状况有关,随着海拔的升高,气温和水分状况发生了变化,从而影响了植物对碳的吸收和储存能力[28]。研究结果表明,巴尔喀什湖南岸地区的植被生长状况良好,这是由于该地区常年处于温热环境中,生态环境质量好,有利于植被生长[29]。另外,经过对比总结发现,EVI值较低的区域植被有变好的趋势,如巴尔喀什湖周边区域,而EVI值较高的区域植被反而表现出退化的趋势,如伊犁河谷地区,这可能与区域气候变化及人类活动有关。

本文对2000—2022年伊犁河流域中国境内和境外EVI的变化趋势、波动程度以及未来变化趋势分别进行了面积占比统计。近20 a来,境内EVI主要呈减少趋势,而境外EVI主要呈增加趋势。境内外EVI波动程度均以低波动及以下为主。境内伊犁河流域未来变化趋势以持续退化为主,而境外伊犁河流域未来变化趋势以持续改善为主。从统计结果来看,2000—2022年伊犁河流域中国境内外EVI除波动程度一致外,变化趋势以及未来变化趋势都相反。经过分析,从以下几个方面简单讨论境内外差异原因:首先境内伊犁河流域的经济以农业和畜牧业为主并且农田区和城市地区正在扩大[30],这造成了大量的过度开垦和过度放牧,同时,草地退化面积逐年增加,水土流失日趋严重[31],以上二者造成境内伊犁河流域土地退化和植被破坏。哈萨克斯坦境内伊犁河流域的主要植被类型为草地[32],该地区通过政策支持、环境监测、季节性轮牧等手段对当地草地生态系统进行保护[33]。第二,境内伊犁河流域农田主要分布在地势平坦地区,种植业主要以粮食作物、经济作物等高耗水作物为主[34],灌溉用水、生产用水和生活用水粗放,造成了水资源的浪费,最后给植被生长造成了负面影响。第三,哈萨克斯坦政府在其北部地区扩大种植,加强对放牧和用水的监管,促进了伊犁河流域生态系统的恢复[35],而中国的环保政策则相对滞后,这也导致了境内伊犁河流域的植被以退化为主。

4　结 论

(1) 近20 a来,伊犁河全流域植被整体呈现改善趋势并且达到显著水平的面积占全流域面积的11.15%,但是中国境内流域植被以退化为主,境外流域植被以改善为主。不同植被类型中,草地和耕地以改善为主,达到极显著水平的面积占比分别为3%~4%和18%~19%。对于不同高程,在1000~3000 m区域内的植被以退化为主,其他高程区域内的植被均以改善为主。

(2) 2000—2022年伊犁河全流域植被总体波动较低,但是中国境内植被呈现较高及以上波动的面积占比较哈萨克斯坦境内更高。对于不同植被类型,草地的年际波动高于林地和耕地。所有高程内植被波动程度都以低波动和较低波动为主,其中高程在2500~3000 m区域内的植被波动最小。

(3) 伊犁河全流域植被未来变化趋势呈现较强的正持续性,中国境内植被以退化为主,境外植被以持续改善为主。全区未来持续改善的面积占比达到52.33%;草地持续改善面积占比为53%~54%,

而林地持续退化面积占比达到73%~74%。海拔低于1000 m和高于3000 m的区域植被未来变化趋势以持续改善为主，其中高程低于500 m区域内的植被持续改善面积占比最大。高程在1500~2500 m的区域内的植被未来以持续退化为主。

参考文献(References)

[1] Du Z Q, Zhang X Y, Xu X M, et al. Quantifying influences of physiographic factors on temperate dryland vegetation, northwest China[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40092, doi: 10.1038/srep40092.

[2] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. Agricultural Forest Meteorology, 2015, 209-210: 87-99.

[3] Berveglieri A, Imai N N, Christovam L E, et al. Analysis of trends and changes in the successional trajectories of tropical forest using the Landsat NDVI time series[J]. Remote Sensing Applications Society, 2021, 24: 100622, doi: 10.1016/j.rsase.2021.100622.

[4] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 195-213.

[5] Asif I, Soe W M, Wang C Y. Examining the ecosystem health and sustainability of the world's largest mangrove forest using multi-temporal MODIS products[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 1241-1254.

[6] 廖成浩, 曾艳, 姚昆, 等. 江西植被EVI时空动态监测及驱动因素分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 981-989. [Liao Chenghao, Zeng Yan, Yao Kun, et al. Spatio-temporal dynamic monitoring and driving factor analysis of vegetation EVI in Jiangxi Province[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44(5): 981-989.]

[7] 阮惠华, 许剑辉, 张菲菲. 2001—2020年粤港澳大湾区植被和地表温度时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1510-1520. [Ruan Huihua, Xu Jianhui, Zhang Feifei, et al. Spatiotemporal changes of vegetation and land surface temperature during 2001 and 2020 in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(8): 1510-1520.]

[8] Qiu B W, Zeng C Y, Tang Z H, et al. Characterizing spatiotemporal non-stationarity in vegetation dynamics in China using MODIS EVI dataset[J]. Environmental Monitoring, 2013, 185: 9019-9035.

[9] Gu Z N, Zhang Z, Yang J H, et al. Quantifying the influences of driving factors on vegetation EVI changes using structural equation model: A case study in Anhui Province, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(17): 4203, doi: 10.3390/rs14174203.

[10] Pueppke S G, Nurtazin S T, Graham N A, et al. Central Asia's Ili River ecosystem as a wicked problem: Unraveling complex interrelationships at the interface of water, energy, and food[J]. Water, 2018, 10(5): 541, doi: 10.3390/w10050541.

[11] 孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等. 2000—2015年伊犁河谷植被覆盖时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1551-1558. [Sun Guojun, Li Weihong, Zhu Chenggang, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation cover in Ili River Valley from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1551-1558.]

[12] 王倩, 杨太保, 杨雪梅. 伊犁河流域归一化植被指数的时空变化及其对气候的季节响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(4): 466-474. [Wang Qian, Yang Taibao, Yang Xuemei, et al. The spatio-temporal changes of normalized difference vegetation index and its response to seasonal climate in Ili River Basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2016, 52(4): 466-474.]

[13] 闫俊杰, 乔木, 周宏飞, 等. 基于MODIS/NDVI的新疆伊犁河谷植被变化[J]. 干旱区地理, 2013, 36(3): 512-519. [Yan Junjie, Qiao Mu, Zhou Hongfei, et al. Vegetation dynamics in Ili River valley of Xingjiang based on MODIS/NDVI[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(3): 512-519.]

[14] Jiao W, Chen Y N, Li W H, et al. Estimation of net primary productivity and its driving factors in the Ili River valley, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(5): 781-793.

[15] 张潇, 夏自强, 郭利丹, 等. 1960—2010年巴尔喀什湖流域干湿特征分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1118-1128. [Zhang Xiao, Xia Ziqiang, Guo Lidan, et al. Analysis of aridity-wetness characteristics in the Balkhash Lake Basin from 1960 to 2010[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1118-1128.]

[16] 叶佰生, 赖祖铭, 施雅风. 气候变化对天山伊犁河上游河川径流的影响[J]. 冰川冻土, 1996, 18(1): 31-38. [Ye Baisheng, Lai Zuming, Shi Yafeng, et al. The effect of climate change on runoff in the Yili River in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(1): 31-38.]

[17] Meng X Y, Gao X, Li S Y, et al. Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982—2015[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 603, doi: 10.3390/rs12040603.

[18] Yu X, Xie J C, Jiang R G, et al. Spatiotemporal variation and predictability of vegetation coverage in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 145: 47-62.

[19] He Y, Pflugmacher D, Li A, et al. Land use and land cover change in Inner Mongolia: Understanding the effects of China's re-vegetation programs[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 918-930.

[20] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599: 967-980.

[21] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. Ecological Indicators, 2015, 51: 117-126.

[22] Mann H B. Non-parametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.

[23] 陈淑君, 许国昌, 吕志平, 等. 中国植被覆盖度时空演变及其对气候变化和城市化的响应[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 742-752. [Chen Shujun, Xu Guochang, Lü Zhiping, et al. Spatiotemporal variations of fractional vegetation cover and its response to climate change and urbanization in China[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 742-752.]

[24] Rao A R, Bhattacharya D. Comparison of Hurst exponent estimates in hydrometeorological time series[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999, 4(3): 225-231.

[25] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence [J]. Water Resources Research, 2010, 5(5): 967-988.

[26] 梁爽, 张吴平, 毕如田, 等. 山西省植被NPP时空变化特征及其驱动力分析[J]. 广西植物, 2018, 38(8): 1005-1014. [Liang Shuang, Zhang Wuping, Bi Rutian, et al. Variation characteristics of vegetation net primary productivity and its driving factors in Shanxi Province[J]. Guihaia, 2018, 38(8): 1005-1014.]

[27] 赵俊红, 周华荣, 卢雅焱, 等. 2000—2015年塔里木胡杨林国家级自然保护区NPP时空动态特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 190-200. [Zhao Junhong, Zhou Huarong, Lu Yayan, et al. Temporal-spatial characteristics and influencing factors of the vegetation net primary production in the National Nature Reserve of *Populus euphratica* in Tarim from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 190-200.]

[28] 王常顺, 汪诗平. 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展[J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 206-216. [Wang Changshun, Wang Shiping. A review of research on responses of leaf traits to climate change[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(2): 206-216.]

[29] 王洪亮, 冯爱萍, 高彦华, 等. 伊犁河流域最大植被覆盖度的时空动态变化[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(6): 161-167. [Wang Hongliang, Feng Aiping, Gao Yanhua, et al. Temporal-spatial dynamic change on maximum vegetation coverage degree of Ili River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(6): 161-167.]

[30] Qi J G, Tao S Q, Pueppke S G, et al. Changes in land use/land cover and net primary productivity in the transboundary Ili-Balkhash Basin of Central Asia, 1995—2015[J]. Environmental Research Communications, 2019, 2(1): 011006, doi: 10.1088/2515-7620/ab5e1f.

[31] 阿依丁·热西坦, 阿斯娅·曼力克, 贠静, 等. 伊犁河谷草地资源利用现状及可持续利用对策[J]. 草学, 2021(3): 78-81, 86. [Rexitan Ayiding, Manlike Asiya, Yun Jing, et al. Current situation and sustainable utilization countermeasures of grassland resources in Ili River Valley[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2021 (3): 78-81, 86.]

[32] Luo L, Du W P, Yan H M, et al. Spatio-temporal patterns of vegetation change in Kazakhstan from 1982 to 2015[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(4): 378-384.

[33] Wen X, Yan H M, Xie X P, et al. Temporal and spatial dynamics analysis of grassland ecosystem pressure in Kazakhstan[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10(6): 667-675.

[34] 李吉玫, 徐海量, 宋郁东, 等. 伊犁河流域水资源承载力的综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(3): 39-43. [Li Jimei, Xu Hailiang, Song Yudong, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Yili Rive[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(3): 39-43.]

[35] Zhou Y, Zhang L, Xiao J F, et al. Spatiotemporal transition of institutional and socioeconomic impacts on vegetation productivity in Central Asia over last three decades[J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 922-935.

Spatiotemporal variations of vegetation in the Ili River Basin from 2000 to 2022

LI Yaqian[1], YANG Jianhua[1], XIA Haobin[1], WU Jianjun[1,2]

(1. Academy of Eco-Civilization Development for Jing-Jin-Ji Megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;
2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The Ili River Basin, spanning China and Kazakhstan, features a delicate ecological environment. Understanding the vegetation changes throughout the basin is essential for the region's sustainable development. This study analyzed spatiotemporal vegetation variations in the Ili River Basin from 2000 to 2022, utilizing enhanced vegetation index data from MODIS. We examined vegetation change disparities within and outside China's portion of the basin, among various vegetation types, and across different elevations. Our findings reveal: (1) Since 2000, vegetation conditions have generally improved across the Ili River Basin, notably in Kazakhstan, whereas a decline was observed within China. Degraded regions are predominantly at elevations between 1000 m and 3000 m. Grasslands and croplands exhibited positive trends, in contrast to forests. (2) Over the past 20 years, the Ili River Basin experienced minor vegetation fluctuations, with more pronounced variations within China. Grasslands encountered higher fluctuations compared to croplands and forests, and the 2500 m to 3000 m elevation range showed relatively stable vegetation. (3) Future projections indicate a prevailing positive trend in vegetation across the Ili River Basin, with approximately 52% of the areas expected to see ongoing improvement. Grasslands are anticipated to have higher improvement ratios than croplands and forests. Regions below 1000 m and above 3000 m in elevation are likely to experience sustained positive changes. This study's insights into vegetation dynamics will inform ecological protection strategies in the Ili River Basin.

Key words: MODIS EVI; change trend; sustainability; the Ili River Basin